第40卷 第2期
2023年2月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 2
Feb. 2023

2000—2020年汾河流域生态环境与水源涵养时空变化

许丽婷， 刘海红， 黄丽洁， 王钰帆
（陕西师范大学地理科学与旅游学院，陕西 西安 710000）

摘 要：基于时空性、生态性和整体性原则，采用2000年、2005年、2010年、2015年以及2020年5期研究数据，利用RSEI模型和InVEST模型评估汾河流域20 a的生态环境质量及水源涵养量的动态变化，并通过相关性分析研究二者之间的关系。结果表明：(1) 2000—2020年RSEI良好级面积增幅较大(23.6%)，优级增加了1.9%，主要分布于汾河流域西部和东部地区。(2) 2020年水源涵养总量为228.9×10⁸ mm，相比于2000年增加了23×10⁸ mm，主要分布于上游水源地，中下游的中部地区水源涵养量较低。(3) RSEI和水源涵养量二者的正相关性区域面积占78.42%，负相关性区域面积占21.58%，总体呈现出正相关性。汾河流域20 a来生态环境持续变好，良好和优面积逐年增加，差和较差面积逐年下降，中等级呈现波动上升后下降的趋势；水源涵养功能持续提高，上游水源地的水源涵养量明显增加，中下游中部地区较低；汾河流域生态环境与水源涵养正相关性区域面积比例最大，水源涵养能力提高能够促进生态环境质量变好，同时生态环境质量提高也能促进当地水源涵养能力的提高；存在21.58%的区域二者关系呈现负相关，主要与二者的主导因素有关。

关键词：生态环境；水源涵养；时空变化；汾河流域

生态环境治理和修复一直是研究的热点，极端天气事件引发的暴雨、洪水等气象灾害促使研究者高度重视水生态安全和风险评估，流域因其对生态环境质量变化和水生态安全有高度敏感性而成为研究的重点区域。流域水源涵养动态变化通过对河川径流、洪水调蓄、植被生长等产生影响，进而影响到流域的生态环境质量。关于生态环境和水源涵养关系的研究主要集中于生态系统服务权衡，有学者对植被覆盖度和产水量的关系进行了分析[1]，认为在阈值范围内，植被覆盖度增加会促进产水量的增加[2]。但也存在研究内容单一问题，不能立足于整体性观点研究生态环境和水源涵养的关系。

生态环境监测是生态环境治理和修复的基础，遥感技术是监测和评估生态环境的有效手段[3]。遥感技术通过长时间和多空间尺度监测生态环境变化并结合特殊的地理背景就能够为区域生态环境治理和修复提供客观的数据依据。由湿度、干度、绿度和热度指标通过主成分分析得到的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)[4]能够用来监测生态环境变化，提高环境监测的客观性。RSEI能够可视化生态环境质量变化的时空特征[5]，被广泛应用于城市群[6]、流域[7]、矿区[8]、山地[9]等区域的生态环境质量评价和动态演变分析，研究成果具有代表性和通用性，能够客观反映出生态环境的整体时空动态演变过程。作为生态系统服务功能之一的水源涵养，能够涵养土壤水分、维持植物生长所需水分、有效调节河川径流量[10]。其中水源涵养评估模型众多，InVEST(Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool)模型以其可视化、定量化优势被学者广泛应用于水源涵养量的计算与评估中[11]，模型较为成熟，研究成果能够有效评价当地水源涵养量的时空变化特征。

汾河作为黄河的第二大支流，水土流失严重，水资源供需矛盾突出[12]，水源涵养能力低[13]，生态环境问题突出，是黄河流域生态环境治理的重点。汾河流域2020年水质整体得到提升，Ⅰ~Ⅲ类断面

收稿日期：2022-06-13； **修订日期**：2022-10-27
基金项目：陕西省水利厅基金项目(201510085)
作者简介：许丽婷(1996-)，女，硕士研究生，研究方向为区域开发与环境治理. E-mail: xuliting987@163.com

比例为41.7%,无劣V类断面,水质属于轻度污染,但大气污染和土壤污染问题严重,生态环境仍需持续治理和修复[14]。以往研究涉及土壤侵蚀[15]、植被覆盖[16]、水资源生态修复补偿[17]、生态系统服务功能[18]、生态脆弱性评价及修复[19]、生态环境评价与治理[20]等,但是总体的生态环境质量评价的时间更新较慢,对于2000—2020年的生态环境质量变化研究较少,基于RSEI的生态环境质量评价也较少,并且以整个汾河流域作为切入点,研究流域总体的水源涵养量较少,缺乏全流域的研究。因此需从时序和空间上补充和更新汾河流域生态环境质量评价,基于整体性原则,对全流域水源涵养功能进行评价分析。立足于整体性观点研究生态环境和水源涵养的关系,既能充分解释生态环境和水源涵养时空动态变化及其关系,也能促进汾河流域统筹协调经济发展和生态建设。

鉴于此,本研究以汾河流域作为研究对象,基于时空性、生态性和整体性原则,采用2000年、2005年、2010年、2015年以及2020年5期研究数据,利用RSEI模型和InVEST模型评估汾河流域20 a的生态环境质量及水源涵养量的动态变化,并通过Pearson相关分析来研究二者之间的相关性,以此来检验20 a来汾河流域生态环境治理效果。

1　研究区概况

汾河发源于山西省宁武县境内(图1),自北向南流经忻州、太原、吕梁、晋中、临汾和运城六个地级市,于运城市万荣县注入黄河,全长713 km,流域南北延伸(110°30′~113°32′E,35°20′~39°00′N),全域面积约39464 km²。汾河支流众多,包括潇河、文峪河、浍河等,流域内地势北高南低,平均海拔1128 m,河道总高差1302 m[21],西南是以吕梁山为主体的山地,东面是以太行山为主体的山地,中间是太原盆地、临汾盆地和运城盆地[15]。汾河流域属于大陆性半干旱季风气候,多年平均降水量为507 mm,年际变化大且年内分布不均,7—9月降水较为集中[22],多年平均气温6~13 ℃[15]。土壤类型以褐土为主[23],水土流失严重,生态环境脆弱。2020年汾河水资源总量232.2×10⁸ m³,当年径流深度54.9 mm,用水总量29.3×10⁸ m³,农田灌溉用水占比较大,干流两岸生态环境明显好转。

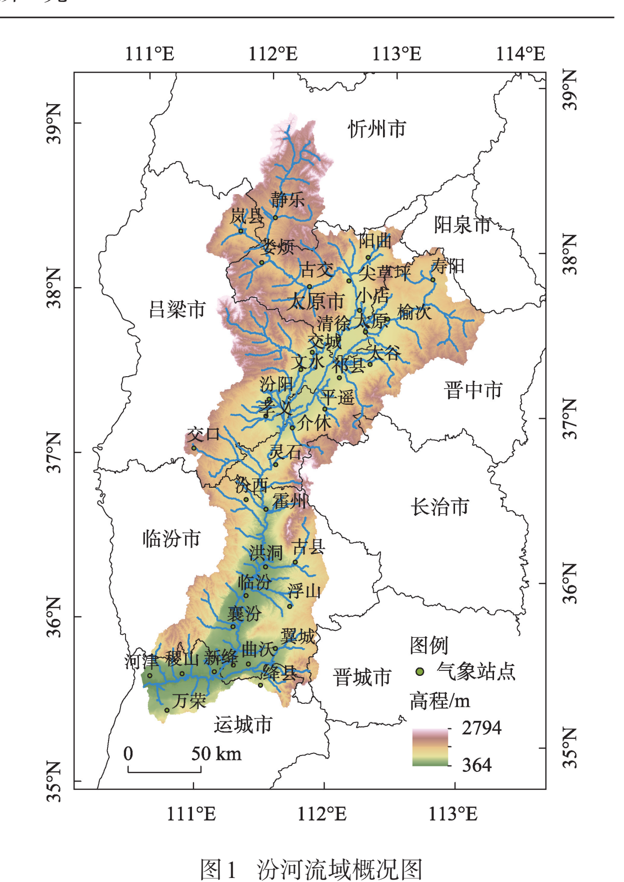


图1　汾河流域概况图

Fig. 1　Overview of Fenhe River Basin

2　材料与方法

2.1　数据来源及预处理

数据来源及预处理见表1。

2.2　研究方法

2.2.1　遥感生态指数　基于研究区绿度、湿度、干度和热度的考虑,分别选取NDVI为绿度指数、WET为湿度指数、NDBSI为干度指数、LST为热度指数,4个指数分别代表影响生态环境质量的4个方面。为更客观准确的确定4个指数的权重,需要剔除人为干扰,首先对4个指数在ENVI软件中进行归一化处理,再根据将与生态环境质量相关的信息集中到较少的主成分上的主成分分析方法[24],对4个指数进行权重确定。通过主成分分析,保留方差最大的第一主成分,用于表征汾河流域遥感生态指数,对其归一化处理,值越大说明生态环境质量越好。利用ENVI软件生成汾河流域RSEI栅格图层,并于ArcGIS软件中依照徐涵秋[4]提到的分级方法,将RSEI图层重分类为差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、良好(0.6~0.8)、优(0.8~1)。

2.2.2　水源涵养量　基于InVEST模型下的年产水量(Annual Water Yield)模块进行汾河流域水源涵养

表1　数据来源及预处理

Tab. 1　Data source and preprocessing operation

数据类型	空间分辨率/m	数据来源	数据处理
汾河流域	90	中国科学院资源环境科学与数据中心	DEM水文分析,确定流量和流向,划分分水岭,生成流域矢量边界
遥感影像	50	全球云计算平台Landsat影像(TM影像和OLI影像)	中值合成、影像筛选、几何纠正、辐射定标、大气校正、拼接裁剪
土地利用类型	30	生态遥感前沿	5期数据均进行Albers投影转换、流域矢量数据裁剪等预处理
降水量	1000	国家地球系统科学数据中心	5期数据均进行Albers投影转换、流域矢量数据裁剪等预处理
潜在蒸散发	1000	Applied Spatial Econometrics	5期数据均进行Albers投影转换、流域矢量数据裁剪等预处理
土壤	1000	国家青藏高原科学数据中心	5期数据均进行Albers投影转换、流域矢量数据裁剪等预处理

量计算,此模型依据水量平衡原理,在不考虑地表水和地下水相互作用的情况下,加入气候、地形、土地利用等数据,依托区域空间位置,对空间各点进行水量平衡分析,用降水量减去实际蒸散量得到每个点的径流量[25],再以空间分布模式将图层输出,在ArcGIS平台加载图层可得到汾河流域的年产水量栅格数据。根据土地利用类型计算地表径流系数和径流量,用产水量减去径流量即为研究区的水源涵养量[26]。

2.2.3　相关性分析　为进一步分析生态环境质量与水源涵养量之间的关系,参考李晓荣等[27]采用的空间相关性分析方法,基于栅格数据空间像元单位,在ArcGIS软件中对汾河流域水源涵养量和遥感生态指数进行空间相关性分析。计算公式如下:

Pearson空间相关分析:

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}}$$

式中:R_{xy}为x和y的相关系数;N代表年数,N=5;i为第i年,取值为1~5;x_i为水源涵养量;$\bar{x}$为2000—2020年水源涵养量的平均值;y_i为遥感生态指数;$\bar{y}$为2000—2020年遥感生态指数的平均值。其中R取值范围为[−1,1],R的绝对值越接近1,代表相关性越强,R取正为正相关,R取负为负相关。

2.2.4　区域统计分析　根据区域统计分析方法,通过ArcGIS平台叠加河段流域、县域边界和RSEI空间分布图,研究不同河段流域尺度和县域尺度下RSEI各等级面积的空间分布和时空动态变化程度。结合不同河段流域和县域尺度,对流域RSEI和水源涵养量进行空间相关性分析,探讨二者的相关性及可能的影响因素。

3　结果与分析

3.1　遥感生态指数时空变化特征

3.1.1　时间尺度变化特征　依据上述遥感生态指数计算和分级方法,将汾河流域遥感生态指数分为:差、较差、中等、良好和优5个级别,以5 a作为一个时间梯度,从时间尺度上统计RSEI各分级面积及占比并分析RSEI发展趋势。通过发展趋势可以明显看出,RSEI的5个级别从2000—2020年呈现"两增两减一波动"状态,良好和优级面积呈现逐年增加趋势,差和较差级面积呈现逐年下降趋势,中等级呈现波动上升后下降趋势。

从发展趋势方面反映了汾河流域2000—2020年生态环境质量呈现极大变好趋势,从治理成果方面反映了汾河流域多年的生态环境治理和恢复措施成效显著。分析2000—2020年RSEI各级面积及占比(图2),优级面积从仅有的90.9 km²到832 km²,增加了1.9%;良好级面积增幅较大,从6600.3 km²增加到15852.5 km²,增加了将近10000 km²,增幅达到23.6%,2020年优和良好级达到42.6%,可以看出,整体生态环境持续好转状态;中等级面积占比较大,是汾河流域生态环境的主体部分,2000年占比47.7%到2020年49.2%,面积从18676.1 km²到19249.6 km²,增幅较小,仅增加了1.5%,说明汾河流域整体生态环境没有变差,中等水平比例较高;较

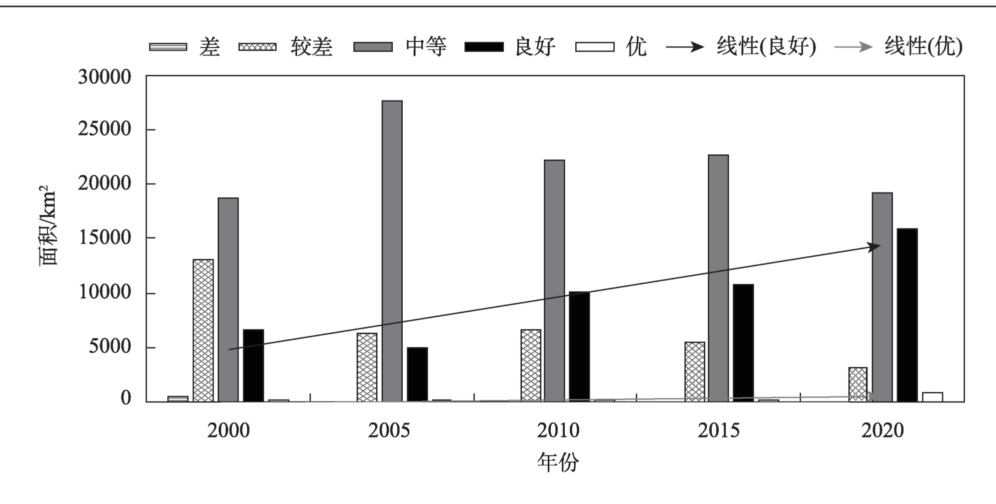


图2 2000—2020年遥感生态指数各分级面积

Fig. 2 Statistics of area of remote sensing ecological index at different levels from 2000 to 2020

差级面积减小幅度较大，2000年占比33.8%到2020年占比8.2%，面积从13231.2 km²减少到3192.9 km²，减少了10038.3 km²；差级面积从531.7 km²减少到3.1 km²，2020年面积占比几乎为0，说明生态环境治理效果显著，整体呈现较好状态。

3.1.2 空间尺度变化特征 分析2000—2020年RSEI空间分布图（图3），优和良好主要分布于吕梁山以东和太行山以西的边缘地区，中等级分布最广，差和较差零散分布于汾河干流周边，这与山区植被生长较好和人为干扰较小有关，汾河干流周边水资源相对较多，城市分布和工业发展集中，生态环境破坏较大。2000年RSEI差和较差面积占比较大（图3a），优和良好占比较少，中等级适中，其中差级主要分布于汾河下游地区，以洪洞县、翼城县、曲沃县、襄城县、新绛县、稷山县和闻喜县为主，煤矿开采严重破坏地表自然景观和生态环境，导致生态环境质量很差；较差级主要分布于上游和中游地区，以岚县、娄烦县、静乐县、太原市东部、孝义市、介休市、交口县和灵石县为主；良好级主要分布于上游西北部、中游西北部、下游东北部地区，以宁武县西部、交城县西部、文水县、介休市东南部、沁源县西南部、长治市东部、古县西北部等为主。2005年RSEI主要以中等级为主（图3b），差和优分布较少，较差主要分布于汾河上游东南部和下游南部地区，随着植被恢复和生态环境治理工作开展，生态环境逐步好转，良好主要分布于中游西部和下游东部地区。2010年RSEI优级分布较少（图3c），主要分布于阳曲县东北部、东南部和沁源县南部；良好主要分布于汾河上游西北部和东南部、中游西部和东部、下游东北部和东南部；生态环境大幅度改善，但是受工业发展和生态环境治理进程缓慢的影响，差和较差分布仍然较多，较差分布于下游中部和南部地区，差级分布于洪洞县中部偏南地区。2015年RSEI良好和优分布面积增加（图3d），由于汾河上游水源地水土保持工程和植被恢复的落实，大幅度提高生态环境质量，以宁武县西部、文水县、沁源县增加较多；差和较差级分布于汾河中下游，中等级贯穿于汾河流域内部。2020年RSEI优级明显增多（图3e），生态环境治理进入新阶段，在环保政策强制要求下，工业需要绿色发展，生态环境质量大幅度提高，主要以宁武县西部、阳曲县西北部和东南部、文水县、平遥县东南部、沁源县南部、介休市东南部、灵石县东部、翼城县东部和绛县东部为主；良好级较2000年分布地区增加明显，整体流域呈现良好和中等级分布；差和较差分布较少，零散分布于上游西部、下游南部等。从汾河流域RSEI空间分布图的整体分布可以观察发现，整体生态环境呈现极大改善状态，优和良好面积分布范围扩大明显，差和较差分布范围大幅度缩小，说明汾河流域生态环境治理效果显著，但是汾河上游西部和下游南部仍需继续加强治理和修复。

3.1.3 整体时空动态变化程度 在ArcGIS中使用栅格计算器，用后期数据减去前期数据得到变化值，依据前后2个时期RSEI的变化等级，将变化值分为五大类（图4）：明显变差（等级变差两级及以上）、变差（等级变差一级）、不变（等级不变）、变好（等级变

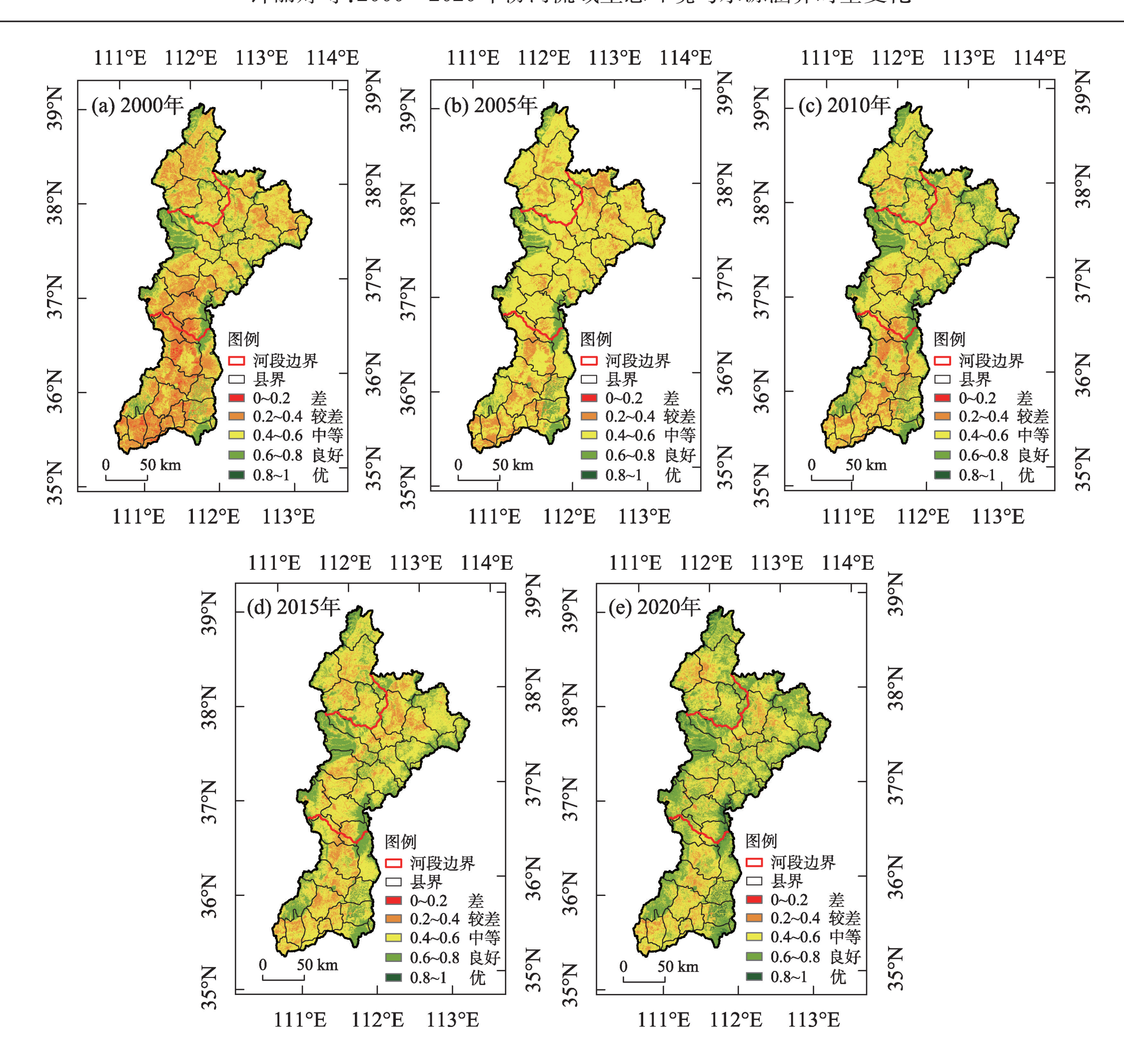


图3 2000—2020年汾河流域RSEI空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of RSEI in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

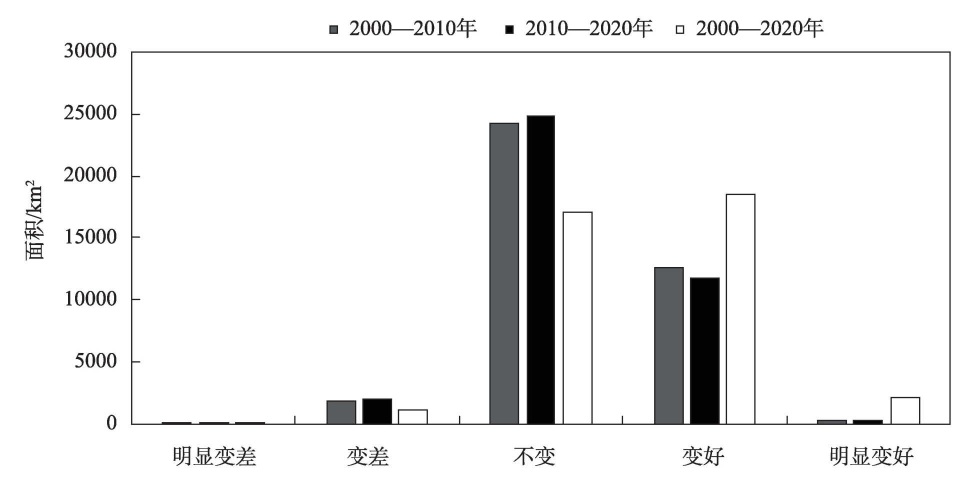


图4 2000—2020年汾河遥感生态指数变化

Fig.4 Changes of remote sensing ecological index of Fenhe River from 2000 to 2020

好一级)、明显变好(等级变好两级及以上)[28]。

2000—2010年汾河流域RSEI以维持原状和变好为主(图5a),发生明显变化的区域较少,其中62.19%的区域环境等级未发生变化(24333.1 km²),主要分布于汾河上游流域;33.09%的区域变好(12634.32 km²),主要分布于中游东部、下游西部和

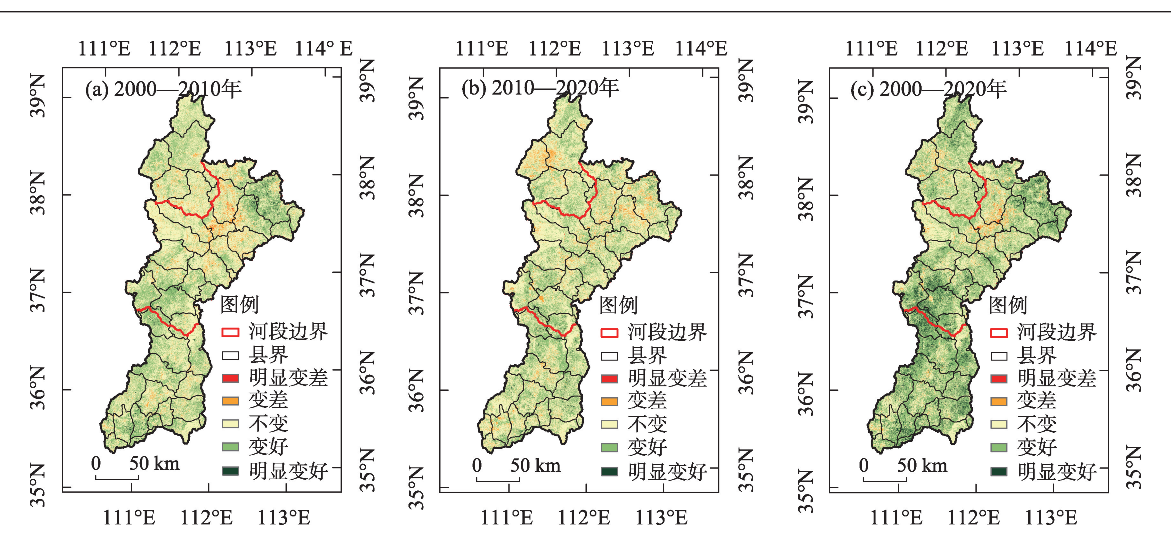


图5　2000—2020年汾河流域遥感生态指数变化空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of remote sensing ecological index changes in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

南部，由于前期工业发展对生态环境的破坏严重，需要重点治理和修复，以平定县、和顺县、昔阳县和汾西县、交口县为主；0.8%的区域环境明显变好(311.47 km²)，以晋中市东北部、阳泉市为主，这与当地生态环境治理投入较大有关，生态环境质量变化明显；在城市扩展的过程中，必然会破坏人地和谐关系，导致生态环境变差，变差区域(1824.10 km²)占比为4.66%，有0.07%的区域面积处于明显变差状态(27.14 km²)，主要集中分布于太原市南部、清徐县中部和平遥县中部地区。2010—2020年汾河流域RSEI处于持续变好状态(图5b)，整体生态环境变好(31.5%)大于变差(5.24%)，明显变好(0.89%)也大于明显变差(0.08%)，等级不变区域面积占比较大(63.61%)，零散分布于汾河流域各地区；11837.16 km²的区域环境变好，以汾河下游流域为主，主要包括孝义市、交口县东部、灵石县西部、长治市西部、汾西县东部等地区；348.63 km²的区域环境明显变好，以灵石县西部、长治市南部、翼城县东部、襄汾县南部等地区为主；变差和明显变差面积占比为5.24%，零散分布于汾河上游西部、中游东部、下游西北部和西南部等地区。由图5c可知，RSEI整体呈现稳定增加趋势，47.51%的区域环境处于变好状态，面积达到18590.53 km²，是RSEI变化最大的区域，主要分布于汾河上游北部、中游东部和下游地区，包括宁武县、静乐县、娄烦县西部、阳泉市、洪洞县西部、临汾市西部等地区；5.71%的区域环境明显变好(2236.15 km²)，以阳泉市、和顺县、晋中市东北部、孝义市、交口县东部、灵石县、介休市、汾西县、古县、新绛县、闻喜县、稷山县东部、翼城县东部和西北部等地区为主；变差(3.03%)和明显变差(0.1%)面积为1226.47 km²，主要分布于上游区域，以太原市和清徐县为主。经过20 a的生态环境恢复和治理，汾河流域整体生态环境持续变好，少数地区由于经济发展需求使得生态环境变差，需要持续修复和治理。

3.2　水源涵养量时空变化特征

3.2.1　时间尺度变化特征　根据InVEST模型合理设置参数，计算汾河流域水源涵养量，统计2000—2020年汾河流域以栅格为单元的平均水源涵养量各参数总量及变化趋势(图6)。可以明显看出，各参数发展变化趋势，降水量、径流量和产水量与水源涵养量变化趋势一致，均呈现波动递增趋势。汾河流域水源涵养总量由2000年的205.9×10⁸ mm增加到2020年228.9×10⁸ mm，增加了23×10⁸ mm；平均水源涵养量先减少后增加，增加量为16.1 mm，说明汾河流域20 a的水源涵养功能良好，处于持续变好状态；汾河流域年平均降水量处于增加状态，2005年降水量最低(422.6 mm)，2020年降水量最高(513.2 mm)，增加了90.6 mm；平均产水量从2000年的260.8 mm增加到2020年288.2 mm，增加了27.4 mm，说明经过20 a的发展汾河流域产水能力得到提高；平均地表径流量与降水量保持一致趋势，2005年平均地表径流量最低67.3 mm，2020年最高81.6 mm，径流量的变化与降水量密切相关。总体

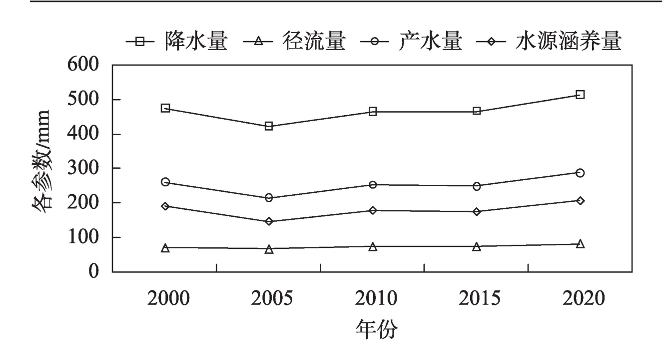


图6　汾河流域平均水源涵养量参数

Fig. 6　Parameters of average water conservation in Fenhe River Basin

水源涵养能力得到提高,这与汾河流域生态环境治理、汾河径流量增加等密切相关。

3.2.2　空间尺度变化特征　统计汾河流域以栅格为单元的平均水源涵养量,以100 mm为一级,将水源涵养量从低到高分为低(0~100 mm)、较低(101~200 mm)、中等(201~300 mm)、较高(301~400 mm)和高(>400 mm)5个级别。由图7可以明显看到,汾河流域水源涵养量主要以较低等级(101~200 mm)和中等级别(201~300 mm)为主,较高等级和高等级分布较少,主要分布于汾河上游源头地区,低等级零散分布于汾河各地。

2000年汾河流域水源涵养量较低区域主要分布于汾河中下游中间区域(图7a),城市快速扩展和工业高速发展、农业大幅用水导致水资源供需矛盾突出,植被破坏严重,产水量低,水源涵养量低,主要包括太原市区县南部、吕梁市区县东部、晋中市区县西部、临汾市区县东部、长治市区县西部、运城市区县北部等地区;尤其是经济发展较好的城市用水量更大,以太原市中部、文水县东部、孝义市西部、交口县北部、长治市中部等地为代表的水源涵养量最低;中等级主要分布于汾河上游和中下游边

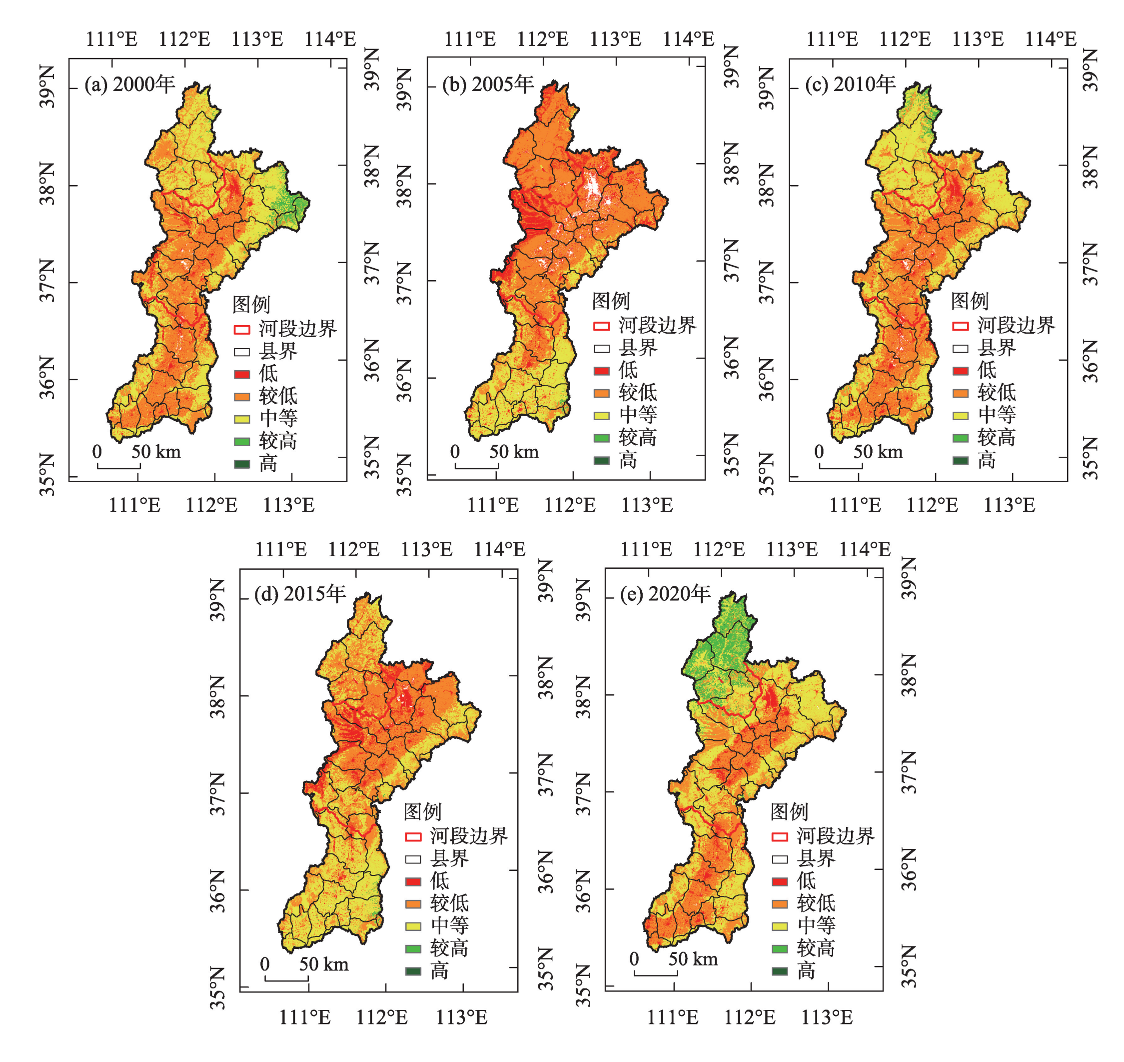


图7　2000—2020年汾河流域水源涵养量空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of water conservation in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

缘地区；较高等级主要分布于汾河中游东部地区，主要包括阳泉市东南部、和顺县北部、昔阳县等地，说明山地开发强度小，植被破坏较少，能够维持一定的水源涵养量，但是高等级几乎很少有分布，总体上存在水资源供需矛盾突出，水源涵养量低的问题。2005年汾河流域平均水源涵养量以低和较低等级为主（图7b），较高等级和高等级分布很少，说明这一时期整个流域的水源涵养量均很低，与降水量低和需水量大有一定关系。2010年汾河流域水源涵养量得到改善（图7c），汾河上游流域北部区域水源涵养量较高，主要包括宁武县东部和北部，中下游水源涵养量依旧较低。2015年汾河流域上游南部、中游和下游北部地区水源涵养量较低（图7d），阳曲县、太原市中部、文水县、汾阳市西部和孝义市西部水源涵养量最低，汾河下游东南部区域水源涵养量呈现较高等级，高等级分布很少。2020年汾河流域水源涵养量相较于2000年有明显增加趋势（图7e），上游植被恢复和水土保持工程的实施，极大改善了自然环境，提高了流域水源涵养功能，上游流域水源涵养量较高，主要包括宁武县、静乐县、岚县、娄烦县西部和文水县西北部等地，尤其以宁武县西部和东南部、静乐县东北部地区最为突出，水源涵养功能极大提高，水源涵养量超过400 mm，处于高等级状态；城市分布集中的中下游地区，用水量大，产水量低，水源涵养量较低，低等级和较低等级主要分布于汾河中游和下游流域，中等级主要分布于边缘地区。2000—2020年汾河流域水源涵养量总体上呈现增加趋势，较高等级和高等级分布范围扩大，以上游源地为主，中等级分布范围由边缘向中心扩展，低等级和较低等级主要分布于中下游的中部地区。

3.2.3 整体时空动态变化程度 在ArcGIS中使用栅格计算器，用后期数据减去前期数据得到变化值，通过自然段点法对变化值进行重分类，负值代表水源涵养量减少，正值代表增加，0代表不变，将变化值划分为：明显减少、减少、不变、增加和明显增加5种变化情况，并统计各自的区域面积（图8）。

2000—2010年汾河流域水源涵养量以增加和不变为主（图9a），发生明显减少的区域面积较小，41.17%的区域水源涵养量处于增加状态（17758.52 km²），前期城市发展大量用水，且汾河水量较少，水源涵养量低，在水资源合理调配和生态环境治理的

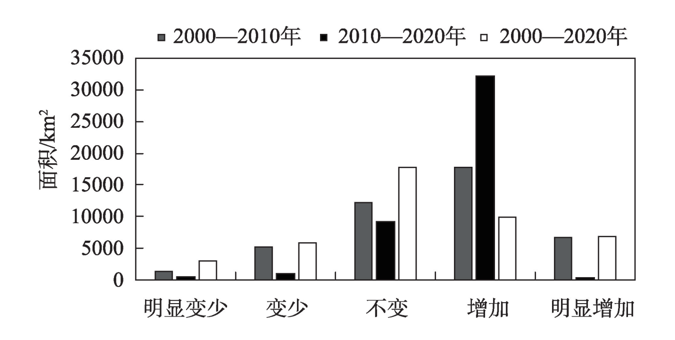


图8 2000—2020年汾河流域水源涵养量变化

Fig. 8 Changes of water conservation in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

政策驱动下，水源涵养量逐步提高，主要分布于汾河流域西部、中部及南部地区；15.47%的区域水源涵养量明显增加，面积达6674.77 km²，尤其以汾河上游水源涵养量增加明显，包括宁武县、静乐县、岚县、娄烦县东部、交城县东部和文水县东部等地区；同时也存在12152.74 km²的区域水源涵养量处于不变状态（28.18%），主要分布于汾河流域中部偏东地区；明显减少（5140.93 km²）和减少（1406.89 km²）区域占总流域的15.18%，主要分布于汾河流域东北部，包括阳泉市、晋中市、太谷县、和顺县和昔阳县等地区。2010—2020年汾河流域水源涵养量主要以增加和不变为主（图9b），汾河水量增加和水资源合理分配促使流域水源涵养量增加，其中增加区域占到74.43%，面积达32101.07 km²，主要分布于上游、中游及下游东部；21.42%区域的水源涵养量没有发生变化，主要分布于汾河流域东北部和西南部，包括阳泉市东部、昔阳县、和顺县、晋中市东部和太谷县东部等地区；明显增加区域面积（283.71 km²）仅占0.66%，明显减少（954.47 km²）和减少（1.28 km²）区域占3.49%，说明汾河流域总体水源涵养量处于持续增加状态；2000—2020年汾河流域水源涵养量增加区域占38.72%（图9c），其中15.8%的区域水源涵养量明显增加（6826.35 km²），主要分布在上游水源地，包括宁武县、静乐县、岚县、娄烦县、交城县东部和文水县东部地区；41.01%区域水源涵养量维持收支平衡（17736.25 km²），以汾河流域中游东部和下游南部地区为主；明显减少（2950.18 km²）和减少（5797.01 km²）区域面积占10.24%，主要分布于汾河流域东北部和西南部，说明水源涵养量减少区域面积较大，需要改善当地水源涵养条件，提升水源涵养能力。经过20 a汾河流域水源涵养总

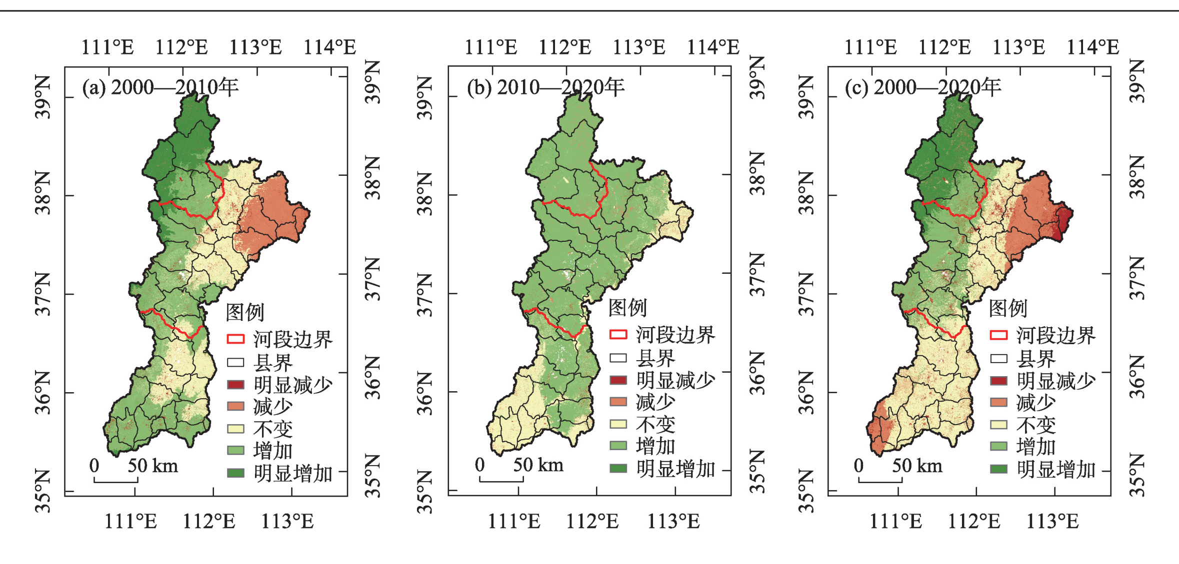


图9　2000—2020年汾河流域水源涵养量变化情况空间分布

Fig. 9　Spatial distribution of water conservation change in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

体呈现增加趋势,但仍有10%区域水源涵养减少,需要加强水土保持建设,提高水源涵养能力。

3.3　生态环境与水源涵养的相关性分析

为进一步探讨生态环境与水源涵养之间的关系,利用Pearson相关分析法对RSEI和水源涵养量进行分析,R的绝对值越接近1,代表相关性越强,相关性区域面积统计分析结果显示(图10):汾河流域RSEI和水源涵养量二者的正相关性面积占比78.42%,负相关性面积占21.58%,流域整体呈现正相关性,说明流域生态环境质量与水源涵养的关系是正向的,即生态环境质量变好能够提高水源涵养功能,水源涵养量提高也会进一步促进生态环境良好发展;对相关性指数较强的区域面积进行分析可知,正相关指数在0.67~0.99之间的区域面积占比达30.95%,负相关指数在-0.99~0.4之间的区域占比为7.93%,进一步说明整体上生态环境和水源涵养的相关性较强,水源涵养量变化会影响生态环境质量,同样生态环境质量变化也会影响流域的水源涵养量;对相关性较弱的区域进行分析可知,20.72%的区域正相关指数在0.01~0.35之间,13.65%的区域负相关指数在-0.39~0之间,部分区域相关性较弱,说明生态环境与水源涵养之间的关系存在差异性,即不同区域社会经济条件和自然条件不同,影响生态环境和水源涵养的主导因素也不同,在二者的关系上表现出差异性。

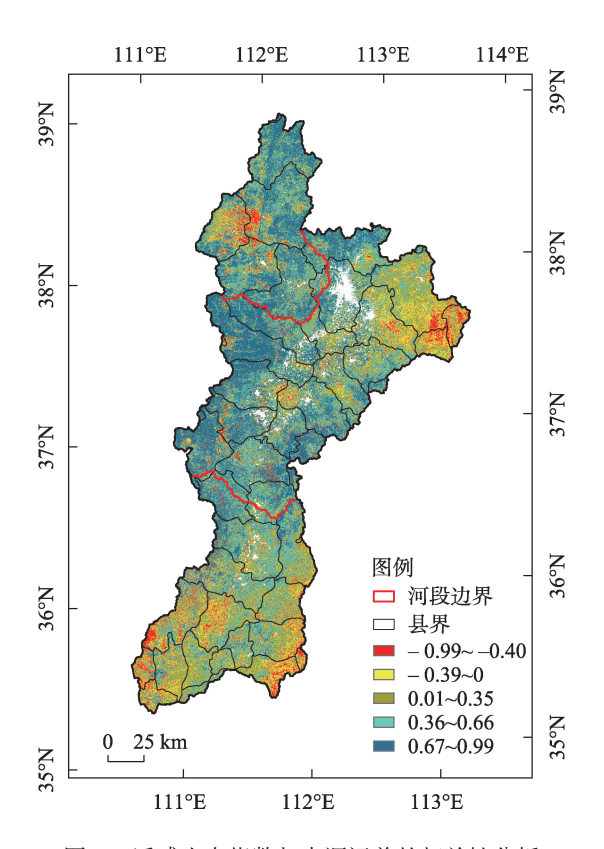


图10　遥感生态指数与水源涵养的相关性分析

Fig. 10　Correlation analysis of remote sensing ecological index and water conservation

生态环境与水源涵养的相关分析空间图说明,正相关指数区域面积较大,且相关性较强区域所占比例较大,可以看出二者之间有一定正向关系,即水源涵养量多,促进当地植被生长和恢复,进一步促进生态环境良好发展,同样生态环境良好,植被生长茂盛,水源涵养功能较强,也能加强区域的水源涵养。从空间位置分析,汾河流域水源涵养量和RSEI的正相关性较强的区域主要分布于汾河上游

北部和南部、中游东部以及下游北部地区，包括宁武县、静乐县、交城县西部、文水县、汾阳市西部、孝义市西部、介休市东部、沁源县西部和南部、灵石县东部等地区，这主要得益于当地的生态环境保护政策、植被恢复和水土保持工程，上游作为水源地，植被茂盛，水源涵养功能强大，生态环境良好；负相关性较强的区域主要分布在上游西南部、中游东部以及下游南部，包括岚县、阳泉市、晋中市东部、和顺县、昔阳县、襄汾县西部、乡宁县、河津市、万荣县、翼城县东部、沁水县和绛县等地区，主要与社会经济发展有关，一方面由于长期的煤矿开采和重工业发展，地表自然环境景观和植被生长遭到严重破坏，水源涵养功能急剧下降，在环保政策的驱动下，当地积极改善生态环境，恢复地表植被景观，但是植被恢复速度慢，水源涵养功能具有滞后性。另一方面由于工业发展和生活农业用水需求量大，城市发展迅速，水资源供需矛盾突出，导致当地水源涵养量少，所以会表现出生态环境变好了但是水源涵养功能依然很低。

4 讨 论

分析汾河流域RSEI时空分布变化趋势，进而分析生态环境质量20 a的发展态势，研究发现RSEI呈现增加趋势，2000年以后汾河流域生态环境质量得到大幅提高，以良好和中等为主。这与乔玉良[29]利用EI对汾河流域生态环境质量评价结果基本一致，说明RSEI模型适用于汾河流域地区。分析其变化原因，主要包括自然和社会两方面，一方面汾河自2000年开始实行退耕还林政策，植被逐渐恢复[30]，另一方面在生态环境保护政策的支持下，社会经济发展的同时开始注重对环境的保护和修复，大幅度改善生态环境质量。值得注意的是，在太原市和清徐县部分地区，生态环境质量变差，这与工业生产有很大关系，需要重点进行调整和改善。

利用InVEST模型计算汾河流域水源涵养量，进而分析当地的水源涵养功能，研究发现水源涵养量呈增加趋势，水源涵养功能得到提高。研究者对汾河流域水源涵养功能的研究多集中于汾河上游源地[18]，认为水源涵养功能得到提高，与本文研究分析的水源涵养能力明显增加区域为汾河上游流域结果一致，这源于上游的水土流失治理、汾河水量增加和植被恢复。需要格外关注汾河流域东北部和西南部，水源涵养量呈现减少趋势，说明这2个地区用水量大于产水量，与社会经济发展有关，需要在发展经济的同时，兼顾地区水源涵养能力，维持生态系统平衡。

利用空间相关性对RSEI和水源涵养量进行分析，认为整体上水源涵养功能与生态环境存在正向相关关系，二者协同发展，即水源涵养能力提高，植被恢复速度加快，促进生态环境质量变好，同时生态环境质量提高也能提高当地的水源涵养能力。但是有21.58%的区域显示二者之间呈现负相关关系，一方面是因为生态环境受多方面因素的影响，社会经济发展对生态环境影响较大，煤矿业发展带来环境问题，地表自然环境景观严重破坏，植被生长受阻，水源涵养功能降低，在恢复植被的过程中，水源涵养功能具有一定的滞后性，会出现生态环境变好了但是水源涵养功能依然很低的情况；另一方面是因为水源涵养也受自然和社会经济发展的双重影响，水资源供需矛盾突出，产水的速度跟不上用水的速度，会导致整体的水源涵养量较低，恢复生态环境的同时，用水量过多也会导致二者存在负相关关系，由于区域经济发展水平和自然环境差异，影响水源涵养和生态环境质量的主导因素不同导致二者出现负相关关系。在分析两者之间关系的方法上，本文仅参考空间Pearson方法进行了分析，没有对比其他相关分析方法，还需多方面量化二者之间的相关关系，准确判断二者的关系，后续研究需要引入其他分析方法。

文中分析的是汾河流域20 a的生态环境质量和水源涵养的时空变化，由于数据量大且处理繁琐，故基于系统性和整体性以及科学性考虑，选择2000年、2005年、2010年、2015年和2020年5期数据进行研究，结果相对于连续20 a数据分析结果来说精度欠缺，故后期可利用连续时间序列进行相关性研究。此外，研究二者之间的相关性，仅采用空间Pearson方法进行了分析，没有对其进一步分析探讨，后期研究中需要采用多方法进行量化二者之间的关系。

5 结 论

本研究基于RSEI模型分析了汾河流域20 a来生态环境质量与水源涵养量的时空动态变化，并通过Pearson空间相关性量化二者之间的相关关系。

研究结论如下:

(1) 汾河流域20 a来生态环境持续变好,良好和优面积逐年增加,差和较差面积逐年下降,中等级呈现波动上升后下降趋势。同时,汾河上游西部和下游南部生态环境较差,仍需继续加强治理和修复。

(2) 汾河流域20 a来水源涵养功能持续提高,2020年水源涵养总量228.9×10^8 mm,相较于2000年增加了23×10^8 mm。汾河上游水源地的水源涵养量明显增加,中下游中部地区较低。

(3) 汾河流域生态环境与水源涵养正相关性比例最大,水源涵养能力提高能够促进生态环境质量变好,同时生态环境质量提高也能提高当地的水源涵养能力。存在21.58%的区域二者关系呈现负相关,这主要与二者的主导因素有关。

参考文献(References):

[1] 叶璇, 康帅直, 赵永华, 等. 陕北黄土高原植被恢复与生态系统服务的时空关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2760-2768. [Ye Xuan, Kang shuaizhi, Zhao Yonghua, et al. Spatio-temporal relationship between vegetation restoration and ecosystem services in the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2760-2768.]

[2] 张耀文, 张勃, 姚荣鹏, 等. 2000—2020年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 223-233. [Zhang Yaowen, Zhang Bo, Yao Rongpeng, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and waterproduction in the Weihe River Basin from 2000 to 2020[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2): 223-233.]

[3] 刘小燕, 崔耀平, 董金玮, 等. 黄河中下游影响区生态空间和生态指数变化评估[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8030-8039. [Liu Xiaoyan, Cui Yaoping, Dong Jinwei, et al. Assessment of ecological space and ecological index changes in the affected area of the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8030-8039.]

[4] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897. [Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.]

[5] 左璐, 孙雷刚, 徐全洪, 等. 区域生态环境评价研究综述[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 806-817. [Zuo Lu, Sun Leigang, Xu Quanhong, Liu Jianfeng, et al. A review of the studies on regional ecological environment evaluation[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2021, 43(4): 806-817.]

[6] 吴小波, 范晓雨, 刘晓敬, 等. 基于Google Earth Engine云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J/OL]. 生态学杂志: 1-16 [2022-10-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220620.1233.010.html. [Wu Xiaobo, Fan Xiaoyu, Liu Xiaojing, et al. Temporal and spatial changes of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform[J]. Chinese Journal of Ecology: 1-16 [2022-08-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20220620.1233.010.html.]

[7] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 等. 基于RSEI的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 943-954. [Wang Lixia, Zhao Rui, Liu Zhao, et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the YanheRiver Basin based on the remote sensing ecological index[J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (3): 943-954.]

[8] 毕卫华, 钱倬珺, 王辉, 等. 基于RSEI模型的平朔矿区生态环境变化研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(4): 62-70. [Bi Weihua, Qian Zhuojun, Wang Hui, et al. Study on ecological environment change of Pingshuo Mining Area based on RSEI model[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(4): 62-70.]

[9] 褚馨德, 贾伟, 张峻豪, 等. 基于RSEI模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(1): 38-42. [Chu Xinde, Jia Wei, Zhang Junhao, et al. Ecological environment quality evaluation of Qilian Mountain Nature Reserve based on RSEI model[J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2022, 34(1): 38-42.]

[10] 王紫晨. 川西农牧交错带生态系统服务权衡与协同关系研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2022. [Wang Zichen. Study on Tradeoffs and Synergies of Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone in Western Sichuan[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2022.]

[11] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于InVEST模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5. [Yu Xinxiao, Zhou Bin, Lyu Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(10): 1-5.]

[12] 马乐宽, 谢阳村, 文宇立, 等. 重点流域水生态环境保护"十四五"规划编制思路与重点[J]. 中国环境管理, 2020, 12(4): 40-44. [Ma Lekuan, Xie Yangcun, Wen Yuli, et al. Keynotes of making the 14th Five-Year Plan for water ecology and environment protection in key river[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(4): 40-44.]

[13] 周伟, 官炎俊, 刘琪, 等. 黄土高原典型流域生态问题诊断与系统修复实践探讨——以山西汾河中上游试点项目为例[J].生态学报, 2019, 39(23): 8817-8825. [Zhou Wei, Guan Yanjun, Liu Qi, et al. Diagnosis of ecological problems and exploration of ecosystem restoration practices in the typical watershed of Loess Plateau: A case study of the pilot project in the middle and upper reaches of Fen River in Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8817-8825.]

[14] 迟妍妍, 王夏晖, 宝明涛, 等. 重大工程引领的黄河流域生态环境一体化治理战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 104-

112. [Chi Yanyan, Wang Xiahui, Bao Mingtao, et al. Integrated governance of ecological environment in Yellow River Basin led by major projects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 104-112.]

[15] 费燕明. 汾河流域土壤侵蚀动态变化分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2012. [Fei Yanming. The Soil Erosion Dynamical Changes Analysis in Fenhe River Basin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of technology, 2012.]

[16] 张会霞, 李永梅, 张娜. 汾河流域植被覆盖度时空特征与地形因子的关系[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 353-359, 368. [Zhang Huixia, Li Yongmei, Zhang Na. Relationship between temporal and spatial characteristics of vegetation coverage and topographic factors in Fenhe River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 353-359, 368.]

[17] 任世芳, 马义娟. 基于生态基流的汾河流域水资源生态修复补偿研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7): 63-67. [Ren Shifang, Ma Yijuan. Study on the eco-compensation of water resources in Fenhe River basin basedon the ecological flow[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(7): 63-67.]

[18] 董敏. 汾河上游流域生态系统服务时空变化及影响因素研究[D]. 太原: 山西大学, 2020. [Dong Min. Evolution of Ecosystem Services and Its Influencing Factors in The Upper Reach of the Fenhe River Watershed[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.]

[19] 武云璐. 基于生态系统服务功能及生态敏感性的汾河上游生态空间划定研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [Wu Yunlu. Study on the Demarcation of Ecological Space in Upstream of the Fenhe River based on Ecosystem Service Function and Ecological Sensitivity[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.]

[20] 王鹏, 魏信, 乔玉良. 多尺度下汾河流域生态环境质量评价与时序分析[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 798-807. [Wang Peng, Wei Xin, Qiao Yuliang. Quality evaluation and time series analysis of eco-environment at multi-scales in Fenhe River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 798-807.]

[21] 张照玺. 气候变化和人类活动对汾河流域入黄径流影响分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2016. [Zhang Zhaoxi. Assessments of Impacts of Climate Change and Human Activities on the Runoff from the Fenhe River Basin into the yellow River[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.]

[22] 付扬军, 师学义, 和娟. 汾河流域景观破碎化时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1606-1619. [Fu Yangjun, Shi Xueyi, He Juan. The spatio-temporal evolution characteristics of landscapefragmentation in Fenhe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1606-1619.]

[23] 田惠文, 毕如田, 朱洪芬, 等. 汾河流域植被净初级生产力的驱动因素及梯度效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 3066-3074. [Tian Huiwen, Bi Rutian, Zhu Hongfen, et al. Driving factors and gradient effect of net primary productivity in Fenhe River Basin[J]. Journal of Ecology, 2019, 38(10): 3066-3074.]

[24] 冯荣荣, 张凯莉, 韩佳宁, 等. 沣河流域生态环境质量的遥感评价及影响因子分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 860-871. [Feng Rongrong, Zhang Kaili, Han Jianing, et al. Remote sensing evaluation and influence factor analysis of ecological environment quality in the Fenghe River Watershed[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(7): 860-871.]

[25] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于InVEST模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 577-585. [Liu Ju, Fu Bin, Zhang Chenghu, et al. Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3): 577-585.]

[26] 刘慧芳. 汾河上游流域水土资源服务功能及承载力耦合研究[D]. 太原: 山西大学, 2019. [Liu Huifang. Coupling Study on the Function and Carrying Capacity of Water and Soil Resources in the Upper Reaches of Fenhe River[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.]

[27] 李晓荣, 高会, 韩立朴, 等. 太行山区植被NPP时空变化特征及其驱动力分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 498-508. [Li Xiaorong, Gao Hui, Han Lipu et al. Spatio-temporal variations in vegetation NPP and the driving factors in Taihang Mountain Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 498-508.]

[28] 安敏, 李文佳, 吴海林, 等. 三峡库区生态环境质量的时空格局演变及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(12): 2743-2755. [An min, Li Wenjia, Wu Hailin, et al. The evolution and influencing factors of the spatial-temporal pattern of ecological environment quality in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2022, 31(12): 2743-2755.]

[29] 乔玉良. 基于遥感与GIS技术的生态环境动态监测研究——以汾河流域为例[J]. 经纬天地, 2014(1): 43-51, 61. [Qiao Yuliang. Research on dynamic monitoring of ecological environment based on remote sensing and GIS technology: Taking Fenhe River Basin as an example[J]. Survey World, 2014(1): 43-51, 61.]

[30] 王宇琛, 李松鸣, 王霄, 等. 汾河流域2001—2013年植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 山西农业科学, 2016, 44(5): 640-645. [Wang Yuchen, Li Songming, Wang Xiao, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation cover from 2001 to 2013 and its response to climatic factors in Fenhe River Basin[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(5): 640-645.]

Spatial and temporal changes of ecological environment and water conservation in Fenhe River Basin from 2000 to 2020

XU Liting, LIU Haihong, HUANG Lijie, WANG Yufan

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710000, Shaanxi China)

Abstract: The ecological environment quality (based on the principles of space-time, ecology, integrity, and the dynamic changes) and water conservation in Fenhe River Basin in the past 20 years were analyzed by using the RSEI model and the InVEST model. The relationship between RSEI and water conservation was studied through the correlation analysis. The results showed that: (1) from 2000 to 2020, the area of a good grade RSEI increased by 23.6%, and the area of excellent grade (mainly distributed in the West and East of Fenhe River Basin) increased by 1.9% (2) In 2020, the total amount of water conservation would be 228.9×10^8 mm (an increase of 23×10^8 mm compared with 2000). High conservation capacity was mostly found in the upstream water supply, while the intermediate region of the middle and lower reaches had poor water conservation ability (3) The positive correlation between RSEI and water conservation was 78.42% . Conclusions: (1) The ecological environment of the Fenhe River Basin has been improving continuously for the past 20 years. The medium level shown a declining tendency after fluctuation, whereas the good and poor areas had both increased annually. (2) Over the past 20 years, the water conservation function of the Fenhe River Basin had been continuously improved. The water conservation capacity of the upstream water source areas had increased significantly, while the intermediate and lower reaches had less water conservation capacity. (3) The proportion of positive correlation between the ecological environment and water conservation in the Fenhe River Basin was the largest. The improvement of water conservation capacity could promote the improvement of ecological environment quality and vice versa. There are 21.58% of the regions with negative correlation, which was mainly related to the dominant factors of the two.

Keywords: ecological environment; water conservation; spatial and temporal changes; Fenhe River Basin